

других сочетаниях ТФ. Сопротивление открытого транзистора было близко к расчетному и наблюдался устойчивый процент выхода годных кристаллов. Эти условия первой стадии диффузии были выбраны в качестве оптимальных.

Из проведенных исследований следует, что для определения направления смещения поверхности отклика относительно ранее выбранного центра настройки достаточно было восьми опытов, а для точного определения нового центра настройки — 16 опытов.

Поступила в редколлегию 25.03.92

УДК 621.396.6

Н.М.ПРИЩЕПА, канд. техн. наук, доц.,
С.Н.ДЕМЕНИН, инж.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА НАДЕЖНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Проведены экспериментальные исследования влияния оптимизации технологического процесса диффузии при формировании областей истока и стока МОП транзистора на основные электрические параметры и надежность микросхемы.

С целью оценки влияния оптимизации технологического процесса (ТП), выразившейся в изменении условий проведения ряда технологических операций, на надежность МОП интегральных микросхем (ИМС), были проведены сравнительные испытания ИМС, изготовленных до оптимизации и в оптимальных условиях ТП. На испытания было поставлено 90 шт. ИМС, изготовленных до оптимизации, и 315 шт. ИМС, изготовленных в оптимальных условиях ТП. Все ИМС предварительно прошли полный производственный цикл и были приняты представителем заказчика.

Программа предусматривала ускоренные испытания с переменной нагрузкой до $1,5 U_{н.н}$ при трех температурных режимах: 25, 125 и 140°C. Схема испытаний показана на рис. 1. По оси абсцисс отложена реальная длительность испытаний t_n и длительность $t_{пр}$, приведенная к нормальным условиям с учетом коэффициентов ускорения. По оси ординат показано отношение испытательного напряжения, подаваемого на сток МОП транзистора, к номинальному. В процессе испытаний на затвор транзис-

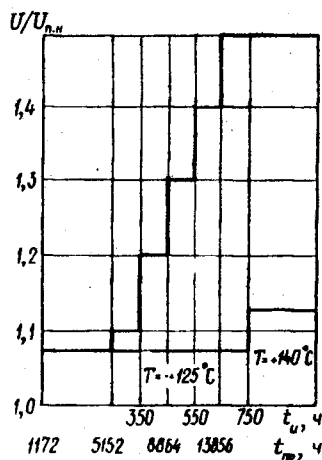


Рис. 1

торов подавалось напряжение в форме меандра. Амплитуда импульсов 25 В, частота 50 Гц. Подложка находилась под смещением +5 В. Во время испытаний измерялись основные параметры: сопротивление открытого транзистора $r_{от}$, ток утечки стока $I_{ут.с}$, ток утечки истока $I_{ут.и}$, ток утечки затвора $I_{ут.з}$. На каждом этапе испытаний рассчитывались среднее значение и среднеквадратичное отклонение контролируемых параметров, а также вероятности безотказной работы по группам ИМС.

В качестве критериев годности были выбраны цеховые нормы контроля электрических параметров.

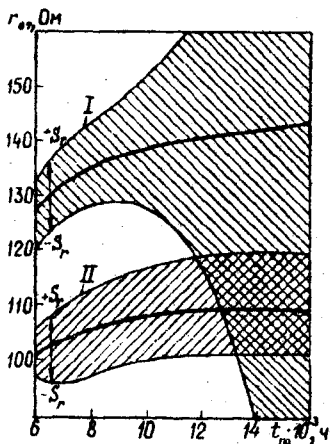


Рис. 2

На рис.2 показаны зависимости среднего выборочного значения сопротивления открытого транзистора $\bar{r}_{от}$ и стандартного отклонения S_r от приведенного к нормальной температуре и номинальному электрическому режиму времени испытаний для ИМС, изготовленных до испытаний (I — неоптимальный ТП), и ИМС, изготовленных после испытаний (II — оптимальный ТП). Для каждой группы ИМС показана полоса $\bar{r}_{от} \pm S_r$. Партии отличаются средними значениями сопротивления открытого транзистора $\bar{r}_{от}$. Для оптимального ТП $\bar{r}_{от}$ меньше на 35 Ом. При этом скорость роста $\bar{r}_{от}$ для партии, изготовленной до оптимизации, выше. Среднее квадратическое отклонение S_r для оптимального ТП оставалось практически

постоянным во всем интервале испытаний, в то же время для неоптимального ТП после 10 000 ч наблюдался резкий рост S_r . Среднее квадратическое отклонение для этой партии возросло более чем в семь раз. Поскольку средние значения $\bar{r}_{от}$ по партиям отличаются (при оптимизации ТП ставилась задача уменьшить $r_{от}$), то для сопоставимости полученных результатов была рассчитана интенсивность изменения коэффициента вариации $r_{от}$ за единицу времени в зависимости от приведенного времени испытаний

$$\lambda_{kr} = S_r / (\bar{r}_{от} t_{пр}),$$

где $t_{пр}$ — длительность приведенного времени испытаний до момента очередного измерения параметров.

Графики зависимости λ_{kr} от длительности испытаний для исследуемых групп показаны на рис.3. В интервале испытаний до 10 тыс. ч характер изменения λ_{kr} для обеих групп одинаков. Однако при дальнейших испытаниях для группы, изготовленной до оптимизации, наблю-

дается резкий рост $\lambda_{кр}$, а затем интенсивность изменения $\lambda_{кр}$ стабилизируется.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом: так как условия измерения сопротивления открытого транзистора во время испытаний не изменялись, то основной вклад в резкое возрастание $r_{от}$ для некоторых ИМС могут внести пороговое напряжение и эффективная подвижность носителей в канале μ . Во время испытаний пороговое напряжение U_0 группы с неоптимальным ТП увеличилось на 2—2,3 В, а с оптимальным ТП — на 1,8—2 В по отношению к начальным значениям в нормальных услови-

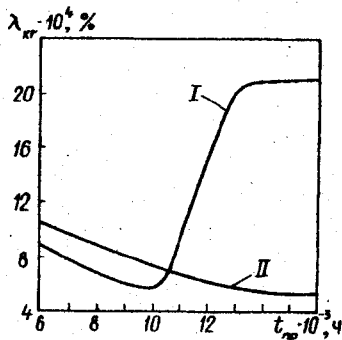


Рис. 3

ях. Средние квадратические отклонения U_0 для обеих партий практически одинаковы. Поэтому можно предположить, что значительное увеличение S_r для неоптимального ТП (I на рис. 3) связано не только с возможным ростом U_0 , но и с уменьшением эффективной подвижности носителей в канале μ для некоторых ИМС. Поскольку уменьшение эффективной подвижности μ можно связывать с возрастанием числа центров рекомбинации, то можно предположить, что с увеличением длительности испытаний число центров рекомбинации носителей в области канала будет расти. Вероятность появления центров рекомбинации зависит от площади канала, дефектности подложки, качества поверхности раздела Si — SiO и условий испытаний.

Все ИМС, изготовленные до оптимизации, были во время испытаний забракованы по причине увеличения $r_{от}$ сверх нормы. В то же время ни одна из ИМС, изготовленных при оптимальных условиях (II на рис. 3), не была забракована по $r_{от}$.

Токи утечки стока и истока при увеличении длительности испытаний до 5—7 тыс. ч несколько увеличились, но оставались ниже установленных норм контроля. При дальнейшем увеличении длительности испытаний токи стабилизировались. Во время испытаний отказов ИМС по причине возрастания токов утечки $I_{ут.с}$ и $I_{ут.и}$ не было. Уровень токов утечки для ИМС, изготовленных до оптимизации, выше, чем для ИМС, изготовленных после оптимизации. Для обеих групп ИМС, поставленных на испытания, зависимости интенсивности изменения коэффициента вариации $I_{ут.с}$ убывающие. Для ИМС, изготовленных до оптимизации, зависимость $\lambda_{кр} = f(t_{пр})$ расположена ниже, чем для оптимального ТП.

Токи утечки затвора $I_{ут.з}$ с возрастанием длительности испытаний повышались для всех групп ИМС, но оставались ниже установленного критерия годности. Однако характер изменения $I_{ут.з}$ для ИМС, по-

лученных при различных температурных режимах первой стадии диффузии, был различным (рис.4). Особенно отчетливо обнаруживалось

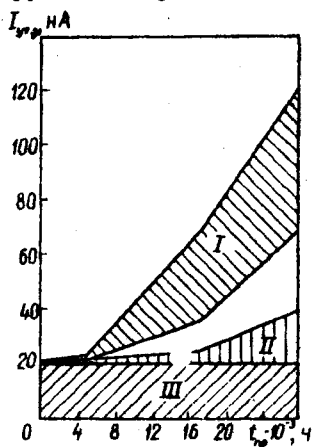


Рис. 4

это отличие при температуре $+140^{\circ}\text{C}$ (в интервале 17 200—27 700 ч). Для партий, изготовленных при $T_1 = 980^{\circ}\text{C}$ (область I на рис. 4), интенсивность роста $I_{ут,з}$ выше, чем для партий, изготовленных до оптимизации (III). Промежуточное положение занимают партии, изготовленные при оптимальных условиях первой стадии диффузии бора (II). Это объясняется тем, что токи утечки затвора определяются токами обратно смещенного $p-n$ -перехода балластного резистора и токами паразитного транзистора схемы защиты затвора. Поскольку условия проведения первой стадии диффузии определяют площадь $p-n$ -перехода и длину канала паразитного транзистора, то они будут оказывать влияние на $I_{ут,з}$.

В процессе испытаний рассчитывалась интенсивность увеличения токов утечки:

$$\lambda_{кз} = [I_{ут,з}(t_{пр}) - I_{ут,з}(t_{пр0})] / [I_{ут,з0}(t_{пр0})(t_{пр} - t_{пр0})],$$

где $I_{ут,з}(t_{пр})$, $I_{ут,з}(t_{пр0})$ — значения токов утечки затвора в момент времени $t_{пр}$; и к началу ступенчатых испытаний ($t_{пр0} = 1172$ ч). Интенсивность увеличения $I_{ут,з}$ может использоваться для оценки ресурса ИМС и вероятности безотказной работы. Наибольший интерес представляют значения $\lambda_{кз}$, вычисленные в конце ступенчатых испытаний при $T = +125^{\circ}\text{C}$ и $U_{п} = 1,5U_{п.ном}$, а также в конце испытаний при $T = +140^{\circ}\text{C}$ и $U_{п} = 1,5U_{п.ном}$. Для этих точек наблюдался наибольший рост токов утечки. Рассчитанные значения $\lambda_{кз}$ для различных партий приведены в таблице.

Интенсивность изменения токов утечки затвора на испытаниях

Номер испытания	Температура стадии $T^{\circ}\text{C}$	$\lambda_{кз} \cdot 10^4, \text{ч}^{-1}$ за время испытаний, ч		Вероятность P безотказной работы ($t = 25\,000$ ч)
		17 200	27 000	
1	965	1,32	1,86	0,967
2	965	1,8	2,8	0,744
3	965	0,053	0,55	0,999
4	965	0,49	0,34	0,999
5	980	13,6	2,04	0,261

Номер испытания	Температура стадии $T, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{к/з} \cdot 10^4, \text{ч}^{-1}$ за время испытаний, ч		Вероятность P безотказной работы ($t = 25\,000$ ч)
		17 200	27 000	
6	980	14,4	13,1	0,224
7	980	2,4	3,98	0,548
8	980	15,9	33,7	0,268
9	970	2,59	7,33	0,718
10	970	0,138	0,038	0,999
11	950	0,06	0,22	0,999

В этой же таблице приведены значения вероятности безотказной работы ИМС в течение 25 000 ч. Отказавшими признавались ИМС, для которых токи утечки затвора превышали цеховую норму контроля при $T = +125^\circ\text{C}$. Эта норма контроля была также принята для температуры испытаний $+140^\circ\text{C}$. Рассчитанные данные о вероятности безотказной работы являются не абсолютными, а относительными оценками и предназначались для исследования влияния ТФ первой стадии на характеристики надежности ИМС.

По данным испытаний был проведен множественный регрессионный анализ. Значительное влияние на $\lambda_{к/з}$ оказывает только температура первой стадии диффузии. При этом коэффициент регрессии фактора температуры положительный, т. е. с повышением температуры первой стадии будут увеличиваться токи утечки затвора. Для вероятности безотказной работы P значимыми оказались два фактора: температура и длительность первой стадии диффузии. При увеличении длительности процесса диффузии P возрастает, а при повышении температуры — уменьшается.

Таким образом, сравнительные испытания ИМС показали, что во время оптимизации ТП был выбран оптимальный режим первой стадии диффузии. В результате повышения температуры первой стадии увеличилась глубина диффузии $x_{дл}$. Это позволило уменьшить сопротивление открытого транзистора $r_{от}$ и тем самым исключить брак по этому параметру (см. рис. 2, 3). Одновременно несколько увеличались токи утечки затвора при длительных испытаниях (см. рис. 4). Однако уровень $I_{ут.з}$ остался гораздо ниже установленного критерия годности.

В результате внедрения в ТП производства ИМС оптимального режима первой стадии диффузии и изменения условий второй стадии диффузии интенсивность отказов уменьшилась с $5 \cdot 10^{-5} \text{ч}^{-1}$ до $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ч}^{-1}$.